

触觉反馈能否改善虚拟现实中的自我运动感知？

Anatole Lécuyer^{1,*} Manuel Vidal^{1,2} Olivier Joly¹ Christine Mégard¹ Alain Berthoz²

¹CEA 名单

name.lastname@cea.fr

²葡语国家共同体

name.lastname@college-de-france.fr

摘要

本文描述了一个实验，该实验是为了评估触觉反馈对虚拟现实自我运动感知的影响。参与者被要求在被动的视觉导航中估计转弯的角度。有时，在转弯过程中，触觉反馈被发送到参与者的主导手。这种触觉反馈包括将参与者的拳头旋转到与视觉转向相同的角度值。

触觉反馈的存在全面影响了参与者的表现。平均来说，有了触觉反馈，参与者对视觉导航中转弯的角度估计不足。这些结果表明，通过使用适当的触觉反馈，可以在虚拟现实中改善自我运动的感知。导航过程中的触觉刺激可以部分替代本体感觉和前庭系统所提供的缺失信息。

1. 简介

导航可能是沉浸式虚拟现实（VR）的“杀手级应用”之一[13]。VR中的导航可用于培训（飞机驾驶员培训、驾驶模拟、再教育和移动性培训）、设计（城市或建筑项目的虚拟参观）或仅仅是为了娱乐（视频游戏、主题公园）。

在虚拟环境（VE）中，导航几乎完全是通过视觉刺激来模拟的。大多数其他的感官刺激--在现实生活中导航时通常会出现--在VR中通常是不存在的。缺少的信息主要涉及三种不同类型的感觉反馈：本体感觉反馈、前庭反馈和冠状动脉放电的拷贝。

这意味着在导航时，视觉和其他感官模式之间存在感官冲突。这种感觉上的冲突可能是导致网络病的原因--一种在许多VR应用中被观察到的恶心现象。

为了应对这个问题以及改善用户的感受，VE设计师和研究人员提出了使用模拟平台。这些被驱动的平台使用户的身体与视觉运动一致[14]。然而，模拟平台和/或其他运动界面的使用仍然是昂贵和复杂的。

因此，本文的主要目的是研究用另一种感觉反馈来替代和/或模拟缺失的信息--主要是本体感觉和前庭感觉--的可能性：用用户的主导手发送触觉反馈。因此，提出了两个理论问题：

- 触觉反馈能否替代VR中缺失的导航感觉（即本体感觉和前庭信息）？
- 触觉反馈能否改善对自我运动的感知、对运动轨迹的记忆以及对认知地图的创建？

本文介绍了一项初步研究，为这些问题带来一些答案。我们进行了一个实验，除了在VR中使用被动的视觉导航，还使用了简单的触觉反馈。触觉反馈是与视觉导航的转动一起发送给参与者的。触觉反馈包括将参与者的拳头旋转到与实际视觉旋转相同的角度。我们测量了触觉反馈对参与者感知和估计视觉导航中的旋转角度的影响。

2. 相关工作

在虚拟现实中的导航需要使用一个有效和适当的计算机-人机界面（CHI）[17]。通常情况下，所选择的范式会充分利用软件和硬件的可能性。Peterson等人[13]研究了所用硬件设备对VR导航能力的影响。他们比较了两种不同的输入设备的使用情况：一个操纵杆和一个基于主动运动的界面。

* 目前在INRIA/IRISA : anatole.lecuyer@irisa.fr

肢体（虚拟运动控制器或VMC）。他们表明，在导航过程中，使用操纵杆的位置控制略微更精确。但是当使用VMC时，参与者被证明在创建VE的心理地图方面更有效率--特别是在复杂的环境中。

研究人员有时会在视觉模式上提出额外的工具，以改善导航。这些工具包括：虚拟罗盘[15]、视觉地标[12]、网格或无障碍地图[5]。这些工具可能会提高用户在虚拟世界中的寻路能力[5]，以及创建VE的认知地图[12]。

在少数情况下，导航范式使用触觉设备--即力或触觉反馈，以增加导航的感觉。例如，力反馈操纵杆[2]（或轮子）在驾驶汽车或任何其他虚拟船只时为游戏者提供简单的触觉效果。震动或阻力效果会根据飞船的状态或一些特定的事件（滑动、经过草地、碰撞）反馈给用户。

触觉反馈也被用于盲人在虚拟[11]或真实环境中的引导和移动训练[3]。如今，一些“增强型”盲杖可以探测到真实环境中的障碍物，并在触觉模式上产生适当的报警反馈[3]。美国海军也开发了一个基于触觉反馈的系统，用于指导飞机飞行员：触觉情况感知系统[16]。嵌入飞行员夹克中的振动器，根据飞机的方向在不同的位置刺激飞行员的躯干。这个系统有助于减少飞行员的视觉工作量[16]。

最后，虚拟环境可以通过使用一个模拟平台使用户真正地移动[14]。加速被刺激，以便在视觉信息之外被人类的前庭系统所感知。这些刺激可能会改善用户的沉浸感和导航过程中对自我运动的感知[14]。

然而，虚拟和现实导航之间的许多差异是由于对导航中涉及的人类认知过程缺乏了解。在这种情况下，虚拟现实提供了一个有效的工具，在很大程度上被用来研究人类的感知和空间认知[4] [6] [8] [9] [13]。

人类对运动的感觉来自不同的感觉方式（见Harris等人的评论[9]）。自我运动信息可能来自前庭感觉、本体感觉或肌肉指令的传出拷贝。信息也可能由视觉、听觉甚至嗅觉提供。视觉是感知自我运动的一个主要角色。例如，*视流*现象是由覆盖大视野的视流引起的一种强烈的运动错觉[7]。然而、

Ivanenko等人[10]已经证明，在没有视觉的情况下，大脑仍然能够成功地感知和估计运动，即使是在被动运动的情况下。蒙着眼睛的人确实成功地从不同的被动运动条件下经历的几个双维轨迹中提取了旋转值：纯旋转、圆周运动、两个直线段之间的转动[10]。

参与导航的几种感觉模式的互补性和相互影响在很大程度上仍然是未知的。不同的工作表明，除了视觉之外，身体的主动运动可以提高对运动的感知，以及空间知识的设置和转移[4] [6] [13]。Harris等人[8]也表明，在决定对行驶距离的感知时，视线流不是主导因素。尽管在没有竞争线索的情况下，视觉信息可以被准确使用，但“它被任何并发的前庭信息所支配”[8]。在另一篇论文中，Harris等人[9]研究了参与自我运动感知的视觉和非视觉线索的贡献。自我运动的感知距离可以有效地从一个被动的视觉流中估计出来。然而，一个被动的物理运动被证明是一个特别重要的线索：“它不仅唤起了夸张的运动感觉，而且还倾向于支配其他线索”[9]。

3. 器械

3.1. 一般介绍

在我们的实验中，我们考虑了被动视觉导航的情况，在这种情况下，参与者无法控制他们的运动。



图1 - 实验装置。

参与者坐在一个大的投影屏幕前（见图1），观看

一个视觉流程。

对应于虚拟环境中的位移。参与者被限制在一个预先定义的路径上导航，没有改变速度、目光方向或运动方向的可能性。

参与者用右手拿着一个触觉设备（见图1）。在视觉导航过程中，有时会向他们发送触觉反馈。参与者的反应是用一个标准的鼠标输入的--用左手操作（见图1）。

以下部分精确描述了所使用的视觉刺激和触觉反馈。

3.2. 视觉刺激

虚拟导航是对一个虚拟隧道的探索（见图2）。参与者在有圆形部分的管状管道内进行导航。轨迹包括两个直线段之间的一个转弯。这个转弯被定义在水平面上。它产生了一定的偏离角度，要么向左要么向右。

该管道使用3DS MAX 5.1软件进行建模。管道模型由一个环形截面和两个圆柱体组成。组件的内部被均匀地映射为光滑的石壁纹理（见图2）。



图2--虚拟隧道内的被动导航。

与虚拟隧道内的导航相对应的视觉刺激是通过Virttools 2.5软件实时生成的。我们定义了一个探索管道内部模型的虚拟摄像机的轨迹和方向。虚拟摄像机的轨迹被定位在管状结构的中心。摄像机的速度保持不变。在导航开始时，摄像机被定位在第一个圆柱体的中间。视觉导航被停止

当虚拟摄像机到达第二个圆柱体的中间时。

虚拟摄像机在转弯前稍稍开始旋转。这是要与现实生活中的导航相一致。事实上，人类会预测转弯，并在身体其他部位之前开始转动眼睛和头部[10]。

实验装置使用了一个2.5x2米的大型投影屏幕，分辨率为1280x1024像素。该系统使用Barco CRT投影机进行背投。参与者坐在座位上，他们的头与屏幕的距离为2米。参与者的视线与屏幕的中心对齐。视觉刺激是以100Hz的帧率在单眼条件下显示的。除了屏幕上的投影外，没有任何光源。

3.3. 触觉反馈

使用的触觉界面是Haption公司的VIRTUOSE 35-40™设备[1]（见图3）。参与者用优势手抓着界面的末端--一个把手。参与者的前臂放在座位的扶手上，与屏幕垂直。在中立位置，参与者的拳头与前臂对齐。



图3 - VIRTUOSE 35-40™。

在导航过程中，触觉反馈是在转弯的瞬间发出的。触觉反馈包括围绕垂直轴旋转手柄。手柄的运动意味着参与者的拳头以同样的角度旋转。实际上使用了两种类型的触觉反馈：

- **直接触觉反馈。**它包括以与视觉旋转相同的角度旋转手柄，并在视觉旋转后，将手柄旋转回原位。

中立位置。(如果视觉导航向右转了 30° ，则手柄也向右转了 30°)。

- **间接触觉反馈。**它包括以与视觉旋转相同的角度值来旋转手柄，但方向相反。(如果视觉导航向右转 30° ，手柄也向左转 30°)。在视觉旋转后，手柄也被旋转回其中性位置。

在视觉转向过程中，手柄的旋转由虚拟摄像机的方向控制。手柄旋转的角度值完全对应于参考框架中相机的当前方向和相机的初始方向（即垂直于屏幕）之间的差异。手柄的旋转速度是恒定的。在视觉转弯之后，手柄以恒定的旋转速度转回其中性位置。图4显示了导航过程中手柄方向的轮廓。

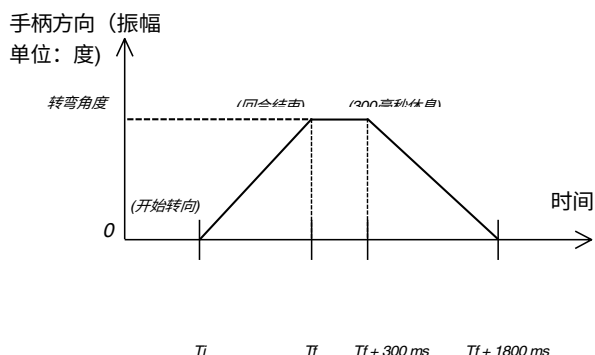


图4 - 手柄的旋转。

两种触觉反馈条件（直接与间接）的命名是由视觉转动和触觉转动之间的一致性决定的，在视觉转动期间。然而，由于手柄在视觉转动后总是被转回中性位置，参与者在每种情况下（直接或间接）都经历了两种触觉转动，但顺序不同。

VIRTUOSE™装置是一个6 DOF力反馈臂。通过使用该装置的力反馈，VIRTUOSE™的手柄被强制保持在同一位置。手柄的方向也被迫与垂直轴保持一致。手柄的唯一可能运动仍然是围绕垂直轴的旋转。VIRTUOSE™的特点--特别是它的最大和持续的扭矩值--阻止了参与者在任何时候移动手柄，停止手柄的运动，或修改手柄的方向。VIRTUOSE™的力反馈被控制并以1000Hz的频率反馈给参与者。

实验平台使用了2台电脑。一台电脑专门用于图形渲染、虚拟摄像机的运动和数据记录。第二台电脑专门用于力反馈的计算和控制。这两台电脑通过以太网线进行通信。

4. 实验程序

4.1. 参与者

有七个人参加了这个实验。他们都是男性，右撇子。他们的年龄在18到25岁之间，没有已知的感知障碍。参与者对本次调查的目的都很陌生。

4.2. 程序

每个试验包括一个探索阶段和一个再现阶段。在探索阶段，参与者观看了虚拟隧道内的被动视觉导航，包括在两个直线段之间的转弯。在转弯过程中，有时会发出触觉反馈。参与者被要求始终看着屏幕，并以足够的力量抓住触觉界面，以便界面不会在手中滑动。在再现阶段--紧接着导航之后--参与者被要求估计视觉转向的角度。估算是用一个标准的鼠标，躺在一张小桌子上，参与者用左手操纵。虚拟世界的俯视图

隧道被显示在屏幕上。当参与者第一次点击鼠标时，鼠标的左右动作被用来旋转隧道的第二段。参与者被要求重现偏离的角度，并通过第二次点击来验证估计的结果。参与者可以用所有他们需要的时间来回答。重现阶段结束后，下一个试验就自动开始了。

没有提供反应反馈。但在实验开始时，参与者被提议进入学习阶段。它包括一个包括18个实验条件的试验块（见下一部分）--以随机顺序选择。在学习阶段收集的数据没有被考虑到数据分析中。整个实验持续了大约40分钟。参与者可以在18个实验条件的每个区块之间休息一下。

4.3. 实验条件

选择了六个转角的价值： $+30^\circ$, $+40^\circ$, $+50^\circ$, -30° , -40° 和 -50° 。这些值是一个

两个实验因素的组合：角度振幅（30、40和50度）和转弯的方向（左或右）。关于触觉反馈，有三种情况：无（无触觉反馈），直接（有直接触觉反馈），间接（有间接触觉反馈）。3个角的振幅、2个可能的转弯方向和3个触觉条件的组合意味着总共有 $3 \times 2 \times 3 = 18$ 个条件。每个条件被测试4次。试验被分组为18个试验块，每个试验块包含18个实验条件。每个区块内的试验顺序是随机的。因此，每个参与者总共进行了 $4 \times 18 = 72$ 次试验。

4.4. 记录的数据

在每次试验结束时，记录两个参数：对转弯角度的估计和反应延迟（从视觉导航结束到角度估计的验证之间所花费的时间）。

5. 结果

5.1. 相对角度误差

对于一个给定的角度（ $\alpha_{expected}$ ）和一个参与者的估计（ $\alpha_{measured}$ ），可以用公式1计算出相对角度误差（ α_{error} ）：

$$\alpha_{误差} = \left| \frac{\alpha_{测量} - \alpha_{预期}}{\alpha_{预期}} \right| \quad (1)$$

图5显示的是相对角度的平均数值。7名参与者根据3种触觉条件--无触觉反馈（Null）、直接触觉反馈（Direct）和间接触觉反馈（Indirect）估计转弯角度时产生的角度误差。

由于图5中角度误差的平均值总是为负值，所以在所有条件下，参与者都全面低估了转弯的角度。

然而，与无触觉条件（空）相比，在有触觉反馈（间接或直接）的情况下，7名参与者的相对误差平均减少。这表明，在有触觉反馈的情况下，参与者对角度的估计不足会减少。

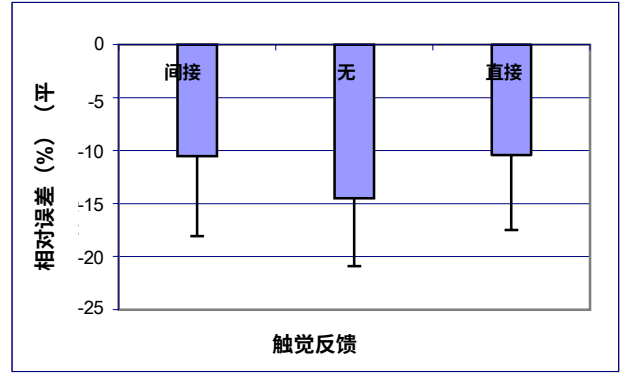


图5 - 相对角度误差的平均值。

对相对误差数据进行了方差分析（ANOVA）。分析中包括的参与者内部因素是角度值（30°、40°和50°），转弯方向（左和右），以及触觉反馈条件（间接，无效和直接）。

方差分析没有显示出触觉条件对相对误差的显著影响（ $F(2,10)=1.85$; $p=0.2$ ）。当分别观察每个参与者的结果时，我们注意到，触觉反馈的存在并没有对所有参与者产生类似的影响。我们可以从描述上将参与者分为两组。第一组（ $n=3$ ，"触觉"）包括那些在有触觉反馈的情况下绝对相对错误明显减少的参与者。第二组包括其他参与者（ $n=4$ ，"无触觉"）。图6显示了小组因素和触觉反馈对平均相对误差的综合影响。

错误。触觉反馈在参与者中的不同效果所带来的变异性可能是造成不同条件下方差分析发现的差异的原因--考虑到所有的

参与者在一起--并不显著。因此，未来必须进行有更多参与者的实验，以证实我们的初步结果。

角度值对相对误差没有显著影响。但是转弯的方向（左或右）对相对误差有主要的显著影响（ $F(1,6)=13.63$; $p<0.01$ ）。对于一个给定的角度振幅，与右转相比，参与者有一个全面的倾向，即更多地低估了左转。这种效应在其他相关的工作中没有观察到[18]。这可能是由于我们实验设备的不对称性造成的。但未来的工作有必要证实这一假设。

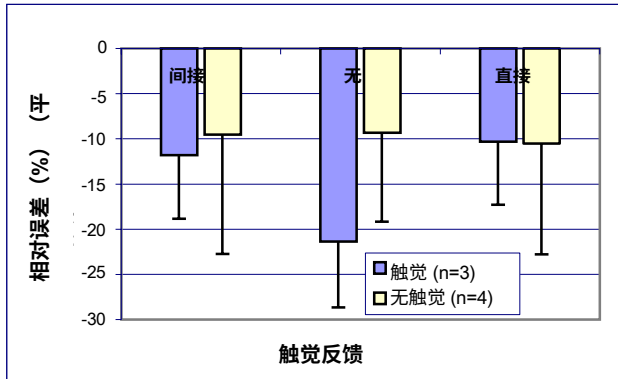


图6 - 群体因素x触觉反馈对相对误差的交互作用。

我们还注意到一些情况（6/504例，即1%），估计的角度与视觉转向的方向相反。所有这些反转都发生在有间接触觉反馈的情况下。这表明，间接触觉反馈有时可能会分散人们的注意力或使他们感到困惑（6/168，即所有间接案例的3.5%）。

5.2. 响应延时

图7显示了7位参与者根据3种触觉条件估计转弯角度时的反应延迟的平均值。

平均来说，与没有触觉的情况（空）相比，7名参与者在有触觉反馈（间接或直接）的情况下，反应潜伏期增加。此外，间接触觉反馈的反应延迟比直接触觉反馈的反应延迟要长。

这意味着，在有触觉反馈的情况下，参与者有一个总体倾向，即反应不那么快--更多的是间接触觉反馈。

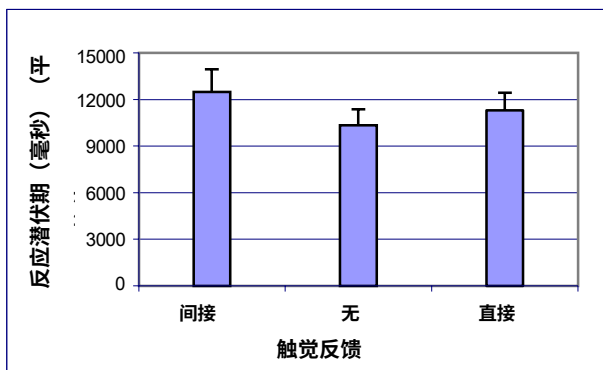


图7 - 响应延迟的平均值。

这种现象在每个参与者身上都被单独观察到，因此独立于群体因素（"触觉"或"无触觉"）。

对反应潜伏期数据进行了方差分析。分析中包括的内部因素是3个角值、2个转弯方向和3个触觉条件。

方差分析显示触觉反馈对反应潜伏期有主要的显著影响（ $F(2,12)=9.11$; $p<0.004$ ）。对比显示，无效条件（无触觉反馈）下的反应延迟明显短于直接条件（ $F(1,6)=6.27$; $p<0.05$ ）和间接条件（ $F(1,6)=12.15$; $p<0.02$ ）。直接条件下的反应潜伏期明显短于间接条件（ $F(1,6)=5.96$; $P<0.05$ ）。

转弯的方向对反应潜伏期没有显著影响。但是发现转弯的角度值对反应潜伏期有主效应（ $F(2,12)=14.78$; $p<0.001$ ）。反应潜伏期随着角值的增加而增加。

5.3. 最后的调查问卷和观察结果

在实验结束时，参与者被要求填写一份调查问卷。

大多数参与者（86%--7人中有6人）认为，触觉反馈可以帮助估计转弯的角度。一些参与者（29% - 2/7）发现，间接的触觉反馈可能会变得混乱，因为它似乎与视觉反馈"不一致"。

这份问卷还表明，至少有43%的参与者（3/7）在模拟过程中感知到了他们身体的"真实"运动感觉。自我运动的感觉是在视觉转弯时感知到的，而且只有在直接的触觉反馈出现时才感知到。

为了改善他们的表现，参与者制定了不同的策略。我们观察到一些"视觉"和"触觉"策略。参与者通常结合并使用一种以上的策略。主要观察到的"视觉"策略包括估计到转弯终点出现的时间。转弯的终点出现得越快，他们对转弯角度的估计就越小。我们观察到的"触觉"策略主要包括记忆触觉界面手柄的旋转。此外，我们注意到一些参与者建立了一个重复的行为，以避免间接触觉反馈的"混乱"影响：参与者口头重复视觉转向的方向（"左"或"右"），直到再现阶段。现在看来，未来的工作有必要测量这些策略对参与者表现的影响。

6. 讨论

重现一个可感知的心理物理变量--在我们的例子中是一个角度--而没有反应反馈或不知道预期值的范围，不可避免地会导致对测量结果的经典的"范围效应"[18]。在我们的实验中，预期的范围效应确实存在，因为在所有条件下，转弯的角度都被全面低估了。

一方面，我们发现对一些参与者来说，在视觉转弯过程中引入触觉反馈改善了对转弯角度的估计，明显降低了他们的整体低估。另一方面，对其他参与者来说，有无触觉反馈的表现平均来说是一样的。因此，我们认为触觉反馈在包含单一转弯的虚拟导航过程中全面改善了对自我运动的感知。但是未来的实验--有更多的参与者--必须进行以证实这些初步结果。

与此相反，当参与者得到触觉反馈时，反应的时间更长。这表明，将触觉和视觉记忆结合起来可以提高估计的准确性，但可能需要更长的处理时间，以便将这两种方式整合成对转弯角度的一致估计。

有趣的是，我们发现在直接触觉模式（设备在与转弯相同的方向旋转）和间接触觉模式（设备在相反的方向旋转）之间，对转弯角度的估计性能几乎没有差别。首先，这可能是由于这两种条件都提出了一个很好的、相同的角度振幅信息的事实。第二个解释是，每种模式都有一个合理的认知解释--因此可以"自然地"提高感知的准确性。在直接模式下，我们可以想象触觉设备再现了视点的方向变化（即它对应于虚拟环境中摄像机的旋转）。在间接模式下，我们可以想象触觉设备再现了环境的方向变化（即它对应于虚拟隧道的旋转）。

这两种触觉"隐喻"可以与文献[20][21]中描述的两类心理旋转--"观看者的旋转"和"物体的旋转"相关。许多研究确实报告说，在想象了观看者的旋转之后，对一个物体阵列--一组有几个方向共同物体--进行空间更新的表现明显好于想象物体的旋转之后（见[20][21]的回顾）。作者对这一差异的解释是，在一个全局性的内在旋转中，对阵列的每个组成部分进行有凝聚力的单独旋转是很困难的。

表示。相反，当观看者移动时，相对参考框架会自然地自动更新。这种解释可能代表了我们在实验中发现的直接和间接模式之间反应延迟的差异，这有利于直接模式。这也与间接触觉反馈所产生的更多错误（颠倒）的事实相一致。

然而，对"观看者的旋转"与"物体的旋转"的优越性的另一种解释是，图像的心理转换可能需要大脑的运动过程[19]。事实上，当两种旋转兼容时，通过操纵杆进行的运动双任务成功地提高了图像的心理旋转的性能[19]。此外，当旋转包括触觉信息时，物体的旋转几乎达到了观看者的旋转表现水平[21]。因此，包括触觉反馈和运动过程可以改善心理旋转，并消除通常对观看者模式比物体模式的偏好[19]。这个假设可以解释为什么在我们的实验中观察到直接和间接的触觉反馈有相同的表现水平。这两种触觉模式包括类似的（但相反的）触觉信息和运动过程。

综上所述，我们的结果表明，触觉反馈可以促进记忆轨迹时涉及的路径整合过程。事实上，记忆轨迹是一个多感官的过程，可以通过在触觉模式上提供更多的信息而得到改善--无论是在低水平还是高水平。

7. 总结

本文是关于触觉反馈对虚拟现实自我运动感知影响的初步研究。我们进行了一个实验，提出了一个简单的触觉反馈来替代虚拟环境中缺乏的自我运动的感觉--主要是本体感觉和前庭信息。这种触觉反馈被添加到一个被动的视觉导航中。

在有触觉反馈的情况下，反应的时间更长。因此，它可能需要更长的处理时间来将两种模式（视觉和触觉）整合成一个一致的估计。然而，触觉反馈在整体上似乎在数量和质量上都改善了对自我运动的感知。平均而言，它减少了参与者对视觉导航中转弯角度的估计不足。

这些结果表明，如果有适当的触觉反馈，在导航方面起关键作用的VR应用可以得到改善。可预见的是

这项工作的应用包括：视频游戏、驾驶模拟器、任务准备、虚拟访问，但也包括盲人的行动训练和指导。

未来的工作。首先，在这项初步研究之后，必须用更多的受试者 ($n>20$) 进行类似的实验。这个未来的实验可以考虑到范围效应，包括一个适当的反应反馈给参与者的校准。第二，本文提出的触觉反馈可以在视觉围绕俯仰轴旋转时进行研究。在这种情况下，关于转弯角度估计的不对称效应（向上与向下）被报道 [18]。触觉反馈能否帮助补偿这种不对称的效果？第三，必须用更复杂的轨迹来测试触觉反馈的增加，如虚拟迷宫 [13]。第四，可以实现其他触觉反馈。例如，力或扭矩反馈可以用来模拟同质化的加速概念。

鸣谢。作者要感谢 J. Suppo 对这项研究的技术贡献。他们还想感谢 Pr.P.R. Persiaux、J.M. Burkhardt 博士和 M. Anastassova 对本文件的宝贵意见。

参考文献

- [1] <http://www.haption.com/>
- [2] <http://www.immersion.com/>
- [3] <http://www.robotics.com/robomenu/guidecan.html>
- [4] Chance, S., F. Gaunet, A. Beall, and J. Loomis, "Locomotion Mode Affects the Updating of Objects Encountered During Travel", *Presence*, Vol.7, Num.2, pp.168-178, 1998.
- [5] Darken, R.P., and J.L. Sibert, "A Toolset for Navigation in Virtual Environments", *Proc. of ACM UIST*, pp.157-165, 1993.
- [6] Grant, S.C., and L.E. Magee, "Contributions of proprioception to navigation in virtual environments", *Human Factors*, Vol. 40, Num. 3, pp.489-497, 1998.
- [7] Gurnsey, R., D. Fleet, and C. Potechin, "Second-order motions contribute to vection", *Vision Research*, Vol. 38, pp. 2801-2816, 1998.
- [8] Harris, L.R., M. Jenkin, and D.C. Zikovitz, "Vestibular cues and virtual environments: choosing the magnitude of the vestibular cue", *Proc. of IEEE VR*, pp.229-236, 1999.
- [9] Harris, L.R., M. Jenkin, D. Zikovitz, F. Redlick, P. Jaekl, U. Jasiobedzka, H. Jenkin, and R. S. Allison, "Simulating self motion I: cues for perception of motion", in *Virtual Reality*, Springer-Verlag, 第6期, 第2号, 第75-85页, 2002年.
- [10] Ivanenko, Y., R. Grasso, I. Israel, and A. Berthoz, "Spatial orientation in humans: perception of angular whole-body displacements in two-dimensional trajectories", *Exp. Brain.Res.*, Vol. 117, Num. 3, pp.419-27, 1997.
- [11] Lécuyer, A., P. Mobuchon, C. Mégard, J. Perret, C. Andriot, and J.P. Colinot, "HOMERE: a Multimodal System for Visually Impaired People to Explore Virtual Environments", *Proc. of IEEE VR*, 2003.
- [12] Ohmi, M., "Roles of Additional Information for Wayfinding in Virtual Environment", *Proc. of ICAT*, 1999.
- [13] Peterson, B., M. Wells, T.A. Furness III, and E. Hunt, "The effects of the interface on navigation in virtual environments", *Proc. of Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 1998.
- [14] Reymond, G., A. Kemeny, J. Droulez, and A. Berthoz, "曲线驾驶中横向加速度的作用：驾驶员模型以及在真实车辆和驾驶模拟器上的实验", 《人的因素》，第43卷, 第3号, 第483-95页, 2001年.
- [15] Ruddle, R.A., S.J. Payne, and D.M. Jones, "浏览大规模'桌面'虚拟建筑：定位辅助工具和熟悉程度的影响", 《存在》，第7卷, 第179-192页, 1998年.
- [16] Suri, N., B. McGrath, A.K. Raj, J.F. Perry, R.W. Carff, T.S. Mitrovich, and A.H. Rupert, "Tactile Situation Awareness System", *Proc. of HCI-Aero*, 1998.
- [17] Tan, D.S., G.G. Robertson, and M. Czerwinski, "探索三维导航：结合速度耦合飞行与轨道飞行", *ACM CHI会议论文*, 2001年.
- [18] Vidal, M., "Influence des cadres de référence sur la mémoire spatiale de trajets en trois dimensions", *PhD Thesis*, ENST, december 2002.
- [19] Wexler, M., S.M. Kosslyn, and A. Berthoz, "Motor processes in mental rotation", *Cognition*, Vol.68, Num.1, pp.77-94, 1998.
- [20] Wraga, M., S.H. Creem, and D.R. Proffitt, "The influence of spatial reference frames on imagined object and viewer rotations", *Acta Psychol.*, Vol. 102, Num. 2-3, pp.247-264, 1999.

- [21] Wraga, M., S.H. Creem, and D.R. Proffitt, "在想象的物体和观察者旋转后更新显示", J.Exp.Psychol.Learn.Mem. Cogn., Vol. 26, Num. 1, pp.151-168, 2000.